

学校编码: 10384

学号: 20720121150035

分类号_____密级_____

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

FeCrCo-Ni-PZT 三元多层磁电复合材料性能研究

**Study on the properties of FeCrCo-Ni-PZT ternary
multilayer magnetoelectric composites**

邓数文

指导教师姓名: 施 展 副教授

专 业 名 称: 材 料 学

论文提交日期: 2015 年 4 月

论文答辩时间: 2015 年 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

磁电复合材料由于具有良好的室温磁电性能而受到广泛的应用。在运用中通常需要给磁电复合材料施加一个偏置磁场以获得高的磁电性能。这对于磁电器件的小型化是不利的,从而限制了磁电复合材料的应用。最近一些研究提出的一种具有自偏置磁电性能的磁电复合材料,这为磁电器件小型化提供了可能。具有自偏置磁电性的复合材料能够在外加偏置场为 0 时就获得较高的磁电性能。本文以 FeCrCo-Ni-PZT 三元系多层磁电复合材料为研究对象,对自偏置进行观测,结合同步分析手段进行了分析,最后基于弹性力学对 FeCrCo-Ni-PZT 三元系多层磁电复合材料磁电性能进行了理论计算,对该体系的自偏置行为进行了解释。

本文通过将磁电测试模块、磁致伸缩曲线测试模块和磁滞回线测试模块进行合理的组合,搭建了一套同步测试装置。该装置能够在施加一次正负扫描磁场的情况下,同时采集到复合样品的磁电信号、磁致伸缩信号和磁感应强度信号。采用该设备测量了磁电复合材料在退磁状态下的同步性能,为 FeCrCo-Ni-PZT 三元系磁电复合材料的深入研究提供了帮助。

本文通过将 FeCrCo、Ni、PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$) 进行复合制备出多层磁电复合材料。实验中观察到该三元系磁电复合材料均具有明显的自偏置磁电效应。文中进一步从复合材料的结构、各相层厚比以及频率三个方面对三层磁电复合材料开展了研究。最后对 PZT/FeCrCo/Ni/PZT 结构的四层磁电复合材料也进行了研究。

在实验研究的基础上,本文通过构建理论模型对 FeCrCo-Ni-PZT 三元系磁电复合材料开展了理论计算。本文建立了 Ni 与 FeCrCo 退磁场相互作用的模型,然后将该模型与多层磁电复合材料的力学模型结合,对 FeCrCo-Ni-PZT 三元系多层磁电复合材料的磁电性能进行了模拟。将该模拟结果与实验结果进行对比,结果表明模拟结果很好的模拟了复合材料磁电性能随磁场的变化趋势。

关键词: 自偏置磁电性能; 多层磁电复合材料; 同步测试; 退磁相互作用

Abstract

Magnetoelectric composites were widely used because of good magnetoelectric properties at room temperature. A bias magnetic field was usually required for magnetoelectric composites to ensure the composite at maximum output state. However, this bias field is not beneficial for the miniaturization of devices made from magnetoelectric composite. Recently, magnetoelectric composite with self-bias effect was developed and it might become a good candidate material for the miniature magnetoelectric devices. The self-bias magnetoelectric composites can provide a remarkable magnetoelectric performance when the bias magnetic field is zero. In this thesis, FeCrCo-Ni-PZT ternary composite was selected as our topic. The self-bias magnetoelectric effect in this ternary composite was studied and analysed by the newly developed synchronization testing technique. Finally, theoretical calculations on the self-bias magnetoelectric effect on FeCrCo-Ni-PZT ternary composites were carried out.

In this paper, a synchronization testing system was developed by combining magnetoelectric testing modules, magnetostriction testing module and magnetic hysteresis loop module. Under one scanning cycle of applied magnetic field, the signal of magnetoelectric, magnetostriction and magnetic induction intensity can be synchronously acquired by a data acquisition system. All the signals of magnetoelectric composites especially from demagnetized state can be obtained by this synchronous test system. This system will be helpful for the research of self-bias magnetoelectric effect in FeCrCo-Ni-PZT ternary magnetoelectric composites.

The multilayer composites combined by FeCrCo, Ni and PZT layers were prepared in this paper. Obvious self bias magnetoelectric effect was observed in these multilayer composites. In this paper, the influence of structure, thickness ratio and frequency on the magnetoelectric coefficient was studied. Besides, the four-layer composites with the PZT/FeCrCo/Ni/PZT structure were prepared and studied.

Based on the experimental result, theoretical models for FeCrCo-Ni-PZT ternary composites were built. A model to deal with the demagnetizing interaction between the FeCrCo and Ni were built in this paper. The magnetoelectric properties of multilayer FeCrCo-Ni-PZT ternary magnetoelectric composites were simulated by considering the demagnetizing interaction mechanism combining with the mechanical

interaction. The magnetoelectric properties of FeCrCo-Ni-PZT ternary magnetoelectric composites simulated by our theoretical model were in good agreement with our experimental results.

Key words: self bias magnetoelectric property, multilayer magnetoelectric composites, synchronous testing, demagnetizing interaction

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 磁电材料的发现与发展	1
1.1.1 单相磁电材料	1
1.1.2 磁电复合材料	2
1.1.2.1 颗粒复合磁电复合材料	2
1.1.2.2 层状磁电复合材料	3
1.1.2.3 纤维增强型磁电复合材料	5
1.2 磁电材料的测试技术	6
1.2.1 静态测试方法	7
1.2.2 动态测试方法	7
1.2.3 单磁场方法	8
1.2.4 脉冲磁场法	9
1.3 自偏置磁电复合材料的研究进展	9
1.3.1 自偏置磁电材料的发现	10
1.3.2 单铁磁相自偏置磁电复合材料	11
1.3.3 梯度结构自偏置磁电复合材料	11
1.3.4 非接触多铁磁相自偏置磁电复合材料	12
1.4 磁电复合材料的理论研究	13
1.4.1 Green 函数法	13
1.4.2 弹性力学方法	14
1.4.3 等效电路法	15
1.4.4 层状磁电复合材料的自偏置理论研究	16
1.5 文章的研究内容和意义	17
第二章 原料与实验方案	18
2.1 原材料选择及其基本的性能	18
2.1.1 FeCrCo 的制备及磁学性能	18
2.1.2 Ni 的制备及磁学性能	19
2.1.3 压电材料	20
2.1.4 粘结剂	20
2.2 实验流程	20
2.3 复合样品的制备	21
2.4 样品性能测试	22
2.4.1 磁电复合材料同步测试	22
2.4.2 法拉第感应电压的矫正	23
2.4.3 磁电频谱测试	25
第三章 同步测试系统的设计	26
3.1 系统及组成模块介绍	26

3.1.1 系统介绍.....	26
3.1.2 系统的组成模块介绍.....	27
3.1.2.1 磁场控制与测量模块.....	27
3.1.2.2 磁电回线测试模块.....	28
3.1.2.3 磁滞回线测试模块.....	29
3.1.2.4 磁致伸缩测试模块.....	29
3.2 工作原理.....	30
3.3 同步测试数据处理.....	32
3.4 本章小结.....	34
第四章 FeCrCo -Ni-PZT 多层磁电复合材料性能研究.....	35
4.1 不同结构 FeCrCo - Ni-PZT 三元系三层复合材料的研究.....	35
4.1.1 Ni/PZT 磁电与磁学性能.....	35
4.1.2 FeCrCo/PZT 磁电与磁学性能.....	38
4.1.3 FeCrCo/Ni/PZT 磁电与磁学性能.....	39
4.1.4 FeCrCo/PZT/Ni 磁电与磁学性能.....	43
4.1.5 PZT/FeCrCo/Ni 磁电与磁学性能.....	45
4.2 不同层厚比的 FeCrCo/PZT/Ni 三层磁电复合材料的研究.....	47
4.2.1 FPN1#样的磁电及磁学性能.....	48
4.2.2 FPN2#复合样磁电及磁学性能.....	50
4.2.3 FPN3#复合样磁电及磁学性能.....	51
4.3 不同频率下的零偏置磁电性能.....	56
4.3.1 不同结构复合材料的零偏置磁电频谱.....	56
4.3.2 不同层厚比复合材料的零偏置磁电频谱.....	57
4.4 FeCrCo-PZT- Ni 三元系四层结构复合材料的研究.....	58
4.5 本章小结.....	62
第五章 多层磁电复合材料的理论研究.....	63
5.1 多层磁电模型的构建.....	63
5.1.1 FPN 模型的构建.....	63
5.1.2 FNP 模型的构建.....	65
5.1.3 PFN 模型的构建.....	65
5.1.4 PFNP 模型的构建.....	66
5.2 铁磁相退磁相互作用模型.....	68
5.3 退磁相互作用模型模拟计算结果.....	70
5.3.1 退磁相互作用模型对磁学性能的模拟结果.....	70
5.3.1.1 FeCrCo 与 Ni 距离为 0 时的磁学性能计算.....	70
5.3.1.2 FeCrCo 与 Ni 距离为 0.5mm 时的磁学性能计算.....	71
5.3.2 退磁相互作用模型对磁电性能的模拟结果.....	72
5.3.2.1 对不同结构复合材料磁电性能的计算.....	72
5.3.2.2 对 FPN 结构不同层厚比的复合材料磁电性能的计算.....	73
5.3.2.3 对 PFNP 四层结构复合材料磁电性能的计算.....	74
5.4 本章小结.....	74

第六章 总结与展望.....	76
参考文献.....	78
攻读硕士学位期间科研成果.....	86
附录 1 探测线圈对交变磁场的标定结果.....	87
致 谢	88

Contents

Chapter 1 Intoduction.....	1
1.1 Discovery and development of magnetoelectric materials.....	1
1.1.1 Single phase magnetoelectric materials.....	1
1.1.2 Magnetoelectric composite materials	2
1.1.2.1 Paticulate composite magnetoelectric composites	2
1.1.2.2 Layered magnetoelectric composites	3
1.1.2.3 Fiber reinforced magnetoelectric composites.....	5
1.2 Testing techniques of magnetoelectric materials	6
1.2.1 Static testing method	7
1.2.2 Dynamic testing method	7
1.2.3 Single magnetic field method	8
1.2.4 Pulse magnetic field method	9
1.3 Research progress of self-bias magnetoelectric composites.....	9
1.3.1 Discovery of self-bias magnetoelectric materials.....	10
1.3.2 Self-bias magnetoelectric composites with single ferromagnetic phase ...	11
1.3.3 Gradient designed self-bias magnetoelectric composites	11
1.3.4 Non gradient designed self-bias magnetoelectric composites with multi ferromagnetic phases	12
1.4 Theoretical research of magnetoelectric composites	13
1.4.1 Green function method	13
1.4.2 Elastic mechanics method	14
1.4.3 Equivalent circuit method.....	15
1.4.4 Theoretical research of self-bias mechanism in layered magnetoelectric composites	16
1.4 Research contents and significance of this paper	17
Chapter 2 Raw materials and scheme of experiment	18
2.1 The selection of raw materials and the basic properties of raw materials ..	18
2.1.1 Preparation and magnetic properties of FeCrCo	18
2.1.2 Preparation and magnetic properties of Ni.....	19
2.1.3 Piezoelectric materials	20
2.1.3 Binder	20
2.2 Experimental process	20
2.3 Preparation of composites.....	21
2.4 Perfomance testing of sample	22
2.4.1 Synchronization testing of magnetoelectric composites	22
2.4.2 Correction of Faraday induced voltage	23
2.4.3 Testing of magnetoelectric spectrum	25
Chapter 3 The design of synchronization testing system.....	26

3.1 Introduce of the system and modules	26
3.1.1 Introduce of the system	26
3.1.2 Introduce of modules of the system.....	27
3.1.2.1 Module for magnetic field control and testing	27
3.1.2.2 Module for magnetoelectric hysteresis loop testing	28
3.1.2.3 Module for magnetic hysteresis loop testing	29
3.1.2.4 Module for magnetostriction testing	29
3.2 Operating mechanism	30
3.3 Data processing of synchronization testing	32
3.4 Summary	34
 Chapter 4 Study of the properties of FeCrCo-Ni-PZT multilayer	
magnetoelectric composites	35
4.1 Study of FeCrCo-Ni-PZT ternaryd trilayer composites with different	
structures.....	35
4.1.1 Magnetoelectric and magnetic properties of Ni/PZT	35
4.1.2 Magnetoelectric and magnetic properties of FeCrCo/PZT	38
4.1.3 Magnetoelectric and magnetic properties of FeCrCo/Ni/PZT	39
4.1.4 Magnetoelectric and magnetic properties of FeCrCo/PZT/Ni	43
4.1.5 Magnetoelectric and magnetic properties of PZT/FeCrCo/Ni	45
4.2 Study of FeCrCo /PZT/Ni trilayer composites with different thickness ratio	
.....	47
4.2.1 Magnetoelectric and magnetic properties of FPN1#	48
4.2.1 Magnetoelectric and magnetic properties of FPN1#	50
4.2.1 Magnetoelectric and magnetic properties of FPN1#	51
4.3 Zero-bias magnetoelectric in different frequency	56
4.3.1 Zero-bias magnetoelectric spectrum of composites with different stuctures	
.....	56
4.3.2 Zero-bias magnetoelectric spectrum of composites with different thickness	
ratio	57
4.4 Study of FeCrCo-Ni-PZT ternaryd four-layer composites with different	
structures	58
4.5 Summary	62
 Chapter 5 Theoretical research of multilayer magnetoelectric	
composites	63
5.1 Model building for multilayer magnetoelectric	63
5.1.1 Model building for FNP	63
5.1.2 Model building for FPN	65
5.1.3 Model building for PFN	65
5.1.4 Model building for PFNP	66

5.2 The model of demagnetization field interaction between ferromagnetic phases.....	68
5.3 Calculation results by the model of demagnetization field interaction	70
5.3.1 Calculation results of magnetic properties by the model of demagnetization field interaction.....	70
5.3.1.1 Calculation results of magnetic properties when the distance between FeCrCo and Ni is 0	70
5.3.1.2 Calculation results of magnetic properties when the distance between FeCrCo and Ni is 0.5mm.....	71
5.3.2 Calculation results of magnetoelectric properties by the model of demagnetization field interaction	72
5.3.2.1 Magnetoelectric calculation results of composites with different structures.....	72
5.3.2.2 Magnetoelectric calculation results of FPN composites with different thickness ratio	73
5.3.2.3 Magnetoelectric calculation results of PFNP four-layer composites ..	74
5.3 Summary	74
Chapter 6 Conclusion and prospect	76
References	78
Publications.....	86
Appendix 1 Calibration results of ac magnetic field by the coil sensor	87
Acknowledgements.....	88

第一章 绪 论

1.1 磁电材料的发现与发展

磁电材料是指一类能够在外加磁场作用下产生电极化或者在外加电场作用下产生磁极化的材料^[1-8]。磁电材料发展到如今主要包含两大类的材料：单相磁电材料和磁电复合材料。研究人员最早是在单相磁电材料中发现磁电效应的。

1.1.1 单相磁电材料

虽然, 1961 年研究人员在 Cr_2O_3 的研究中首次发现了磁电效应, 但是对于磁电效应的研究可以追溯到更早的时候。早在 1888 年, Röntgen^[9]发现处于电场中的移动电解质会产生磁化的现象。17 年后 Wilson^[10]又在观察到处于磁场中的移动电介质发生电极化的现象。在 1894 年, Curie^[11]在对称性原理的基础上指出: 晶体中本征磁电行为存在可能。不过几十年之后, 研究人员才意识到磁电材料只能存在非反演对称性的晶体之中。1959 年, Dzyaloshinskii^[12]根据该原理很好预测了 Cr_2O_3 磁电效应的存在, 这很快被随后的实验所证实。而关于“磁电”名称, 则来源于 Debye^[13]在 1926 年提出的“magnetoelectric”一词。

随着 Cr_2O_3 的磁电效应得到了实验的证实, 人们开始对磁电材料进行广泛和深入的研究, 并且发现了一系列新的单相磁电材料。到 1973 年时, 已经有 80 多种的单相磁电材料被发现和研究。不过, 最初发现的单相磁电材料, 其居里温度通常远低于室温且性能相当低。这些缺陷使得磁电材料的应用受到极大的限制, 因此对磁电材料的研究也曾一度陷入低谷。直到具有良好室温磁电性能的 BiFeO_3 被合成制备出来以后^[14], 研究人员才又开始对单相磁电材料进行广泛的研究。

研究人员在进行单相磁电材料的研究时, 又发现了许多其他类型的单相磁电材料, 如稀土锰氧化物以及一些 M 型铁氧体。这些单相磁电材料通常在室温可以达到一个良好的磁电性能。吴江涛^[15]等人制备了室温性能到达 37mV/cm Oe 的 $\text{Sr}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 陶瓷单相磁电材料。Kim 等^[16]也制备了室温磁电性能达到 3200ps/m(27mV/cm Oe)的铁氧体 $\text{Ba}_{0.52}\text{Sr}_{2.48}\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 单晶体。不过, 目前具有良好室温磁电性能的单相磁电材料的种类仍然较少。从 70 年代开始, 人们意识

到由压电相与磁致伸缩相进行复合得到的磁电复合材料能够产生优异的室温磁电性能时，磁电复合材料便逐渐开始受到研究人员广泛的关注。

1.1.2 磁电复合材料

磁电复合材料是由压电材料和磁致伸缩材料复合而成。相对于单相磁电复合材料来说，良好的室温磁电性能是磁电复合材料的一大优势。这是由于复合用的磁致伸缩材料，其居里温度通常都是在室温以上。磁电复合材料的磁电效应是一种由压电性与磁致伸缩性的乘积产生的效应，其乘积表达式如下式所示^[1]：

$$\text{磁电效应} = \frac{\text{电}}{\text{机械}} \times \frac{\text{机械}}{\text{磁}} \quad (1-1)$$

或者

$$\text{磁电效应} = \frac{\text{磁}}{\text{机械}} \times \frac{\text{机械}}{\text{电}} \quad (1-2)$$

通常对于式 1-1 所表示的磁电效应被认为是正磁电效应，即在外磁场作用下，材料能够产生电极化的效应。而式 1-2 所表示的磁电效应则被称为逆磁电效应，即在外加电场的作用下，材料产生磁化的效应。

磁电复合材料按其结构通常可以分为：颗粒复合、叠层复合、纤维增强三种结构类型的复合材料，其结构示意图如图 1.1 所示。对各种结构的磁电复合材料，研究人员都做了广泛的研究，试图找到高性能的复合材料，并研究其内在的机理。

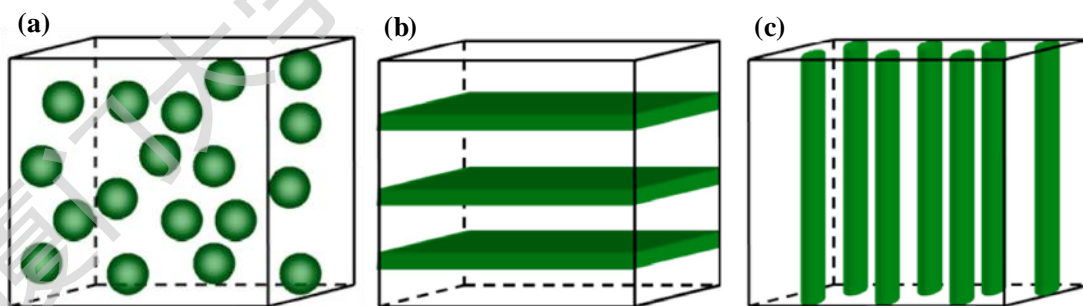


图 1.1 常见的磁电复合材料的结构类型^[1]。(a):颗粒复合型；(b)叠层复合型；(c)纤维增强型。

1.1.2.1 颗粒复合磁电复合材料

1972 年, Philips 实验室采用一种定向凝固的方法制备出了 CoFe_2O_4 与 BaTiO_3

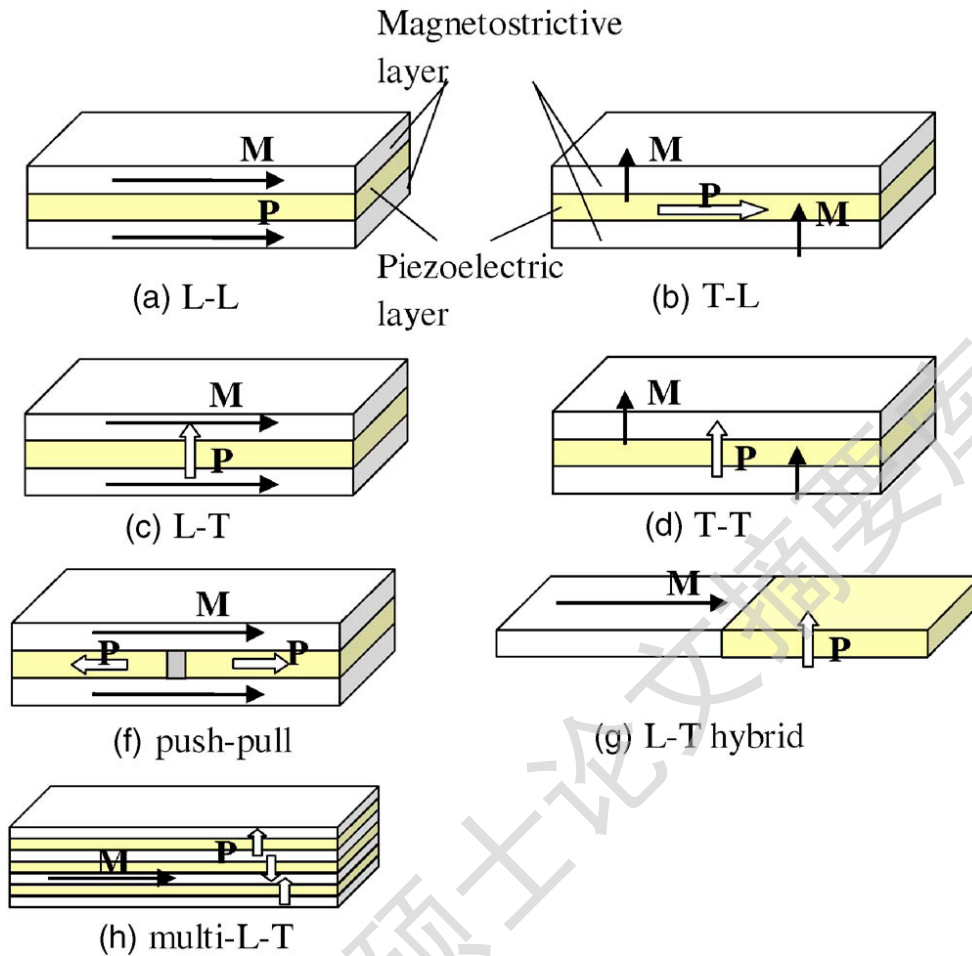
复合的磁电复合材料^[17]，该磁电复合材料的磁电性能达到了 50.2mV/cm Oe。不过该方法工艺复杂，并且难以控制。于是研究人员尝试采用制备陶瓷所用的固相烧结法来制备出颗粒复合的磁电复合材料^[18-21]。虽然采用固相烧结的工艺较为传统且简单，但是固相烧结工艺容易使铁磁相与压电相发生反应从而产生杂相，通常会使得复合材料的性能显著下降。此外，采用固相烧结法制备的磁电复合材料的另一个缺点是具有陶瓷常有的脆性。

为了避免铁磁性颗粒与压电颗粒的反应，研究人员采用了聚合物固化的方法来制备磁电复合材料^[22, 23]。这种工艺不仅避免了铁磁性颗粒与压电颗粒的反应，而且也使得复合材料的柔韧性、加工性能得到了很大的提高。Nan^[24, 25]等运用格林函数的方法，对 Terfenol-D 与铁电聚偏氟乙烯基高分子颗粒复合磁电材料进行预测。预测结果表明：这中复合材料具有巨磁电效应（GME）。后来，Nan^[26]等人制备的 Terfenol-D/PZT/PVDF 聚合物颗粒复合磁电材料，其性能也达到了 42mV/cm Oe。不过聚合物存在老化的问题，并且使用温度相对较低。此外，聚合物一定程度也会对复合材料的磁电性能起到削弱的作用。但实验上过高 Terfenol-D 含量将导致材料变为导体而不具备磁电效应。

1.1.2.2 层状磁电复合材料

相对颗粒复合材料而言，层状结构的磁电复合材料^[27-36]具有结构简单、制备工艺简单且性能优异等优点。层状结构不存在 Terfenol-D 含量限制的问题，因此其受到了研究人员的广泛研究。磁电复合材料的叠层结构虽然简单，但是随着磁致伸缩相磁化方向与压电相的极化方向的改变还是可以分为 L-L^[37]、T-L、L-T、T-T 等模式^[34, 36]，如图 1.2^[1]所示。甚至研究人员也尝试更多层的复合结构，其结构如图 1.2(h)所示。

对于磁电复合材料来说，其磁电系数与压电相的压电系数以及磁致伸缩相的压磁系数都成正比，如式子 $\alpha = k_c e^m e$ 所示。为了获得高的磁电转换系数，通常会采用具有高磁致伸缩的磁性材料。因此具有超磁致伸缩的 Terfenol-D 通常被用作磁电复合材料的磁致伸缩相，并使磁电复合材料拥有巨磁电的效应。2001 年，Jungho RYU 等人^[38]制备的 Terfenol-D/PZT/Terfenol-D 三层磁电复合材料的室温性能就可以达到了 4.68 V/cm Oe。这个磁电系数值是在此之前得到的最好的磁电值的 36 倍。

图 1.2 层状磁电复合材料常见的叠层结构^[1]

磁电复合材料在谐振频率下通常拥有优异的磁电性能，因此人们对磁电复合材料的谐振频率下磁电性能进行了深入的研究。2005 年，J. G. Wan^[39]等制备了 Terfenol-D/epoxy-Pb(Zr,Ti)O₃ 两层磁电复合材料，发现复合材料在一阶弯曲谐振下的磁电系数达到 14.6V/cm Oe，其性能要优于其他弯曲谐振的性能；且一阶弯曲的谐振频率最低，其频谱在 12.1kHz 处。该两层复合材料在低频下的一阶弯曲谐振使得磁电材料有望在能量收集器中得到应用。随后，Zhan Shi^[40]对 PZT/Terfenol-D-epoxy 两层的研究中发现了磁电的二阶弯曲谐振现象，并通过进一步实验得以确认。不过，该谐振频率下的磁电性能低于一阶弯曲谐振频率下的磁电性能。在对称的三层结构中，尽管不会发生弯曲谐振，其在谐振下也拥有优异的磁电性能。2007 年，P. Record^[41]等的研究中报道 Terfenol-D 与压电的三层磁电复合材料谐振频率下最大磁电系数达到了 93.6V/cm Oe。

在谐振频率下，由超磁致伸缩 Terfenol-D 复合而成的磁电复合材料除了具有

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.